

核磁共振和 核四极共振谱仪

周冬梅¹, 郑永男¹, 朱佳政¹, 徐勇军¹, 杜恩鹏¹, 王志强¹, 骆海龙¹,
袁大庆¹, 容超凡¹, M. Mihara², M. Fukuda², K. Matsuta², T. Minamisono², 朱升云¹

(1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

2. Physics Department, Graduate School of Science, Osaka University, Toyonaka, Japan)

摘要:为了开展核物理、粒子物理和凝聚态物理方面的研究,在中国原子能科学研究院建成了1台核磁共振及核四极共振谱仪。利用该谱仪精确测量了¹²B的极化度和¹²B基态磁矩,所测量的¹²B在Cu中的极化度为11.4% ± 0.6%,¹²B磁矩 $\mu = 1.000\ 2 \pm 0.002\ 8$ nm。实验应用证实该谱仪性能可靠。

关键词:核磁共振和核四极共振;核结构;凝聚态物理

中图分类号:TL817.5

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2004)02-0111-04

-NMR and -NQR Spectrometer

ZHOU Dong-mei¹, ZHENG Yong-nan¹, ZHU Jia-zheng¹, XU Yong-jun¹,
DU En-peng¹, WANG Zhi-qiang¹, LUO Hai-long¹, YUAN Da-qing¹,
RONG Chao-fan¹, M. Mihara², M. Fukuda², K. Matsuta²,
T. Minamisono², ZHU Sheng-yun¹

(1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. Physics Department, Graduate School of Science, Osaka University, Toyonaka, Japan)

Abstract: In order to conduct the study on nuclear physics, particle physics and condensed matter physics, the -NMR and -NQR spectrometer was established in China Institute of Atomic Energy. The lifetime, magnetic moment and polarization of¹²B were measured with it. The measured magnetic moment of¹²B is (1.000 2 ± 0.002 8) nm and the polarization of¹²B in Cu is 11.4% ± 0.6%. The experimental results show the reliability of the established -NMR and -NQR spectrometer.

Key words: -NMR and -NQR; nuclear structure; condensed matter physics

核磁共振(-NMR)和核四极共振(-NQR)是利用放射性核作探针的技术,是核物理、粒子物理和凝聚态物理研究中一种不可

缺少的实验手段^[1,2]。-NMR和-NQR通过测量原子核核矩、核和电子间的超精细相互作用,用于原子核结构和性质、凝聚态物质微观结

收稿日期:2003-05-19;修回日期:2003-07-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10175088)

作者简介:周冬梅(1971—),女,北京人,博士研究生,粒子物理与原子核物理专业

构和性质研究。

为了开展极端条件下的核结构研究,测量滴线及其附近短寿命核素的核矩,探索新的壳结构和核晕结构,同时从弱轴矢量流的轴荷及张量项研究核的介子和夸克效应,且利用短寿命同位素束开展凝聚态物理和材料科学研究,在中国原子能科学研究院 2×1.7 MV 串列加速器上研制建立 1 台 β -NMR 和 β -NQR 实验装置。

1 β -NMR 和 β -NQR 谱仪

β -NMR 和 β -NQR 谱仪示意图示于图 1。

建立 β -NMR 和 β -NQR 谱仪有 4 个关键问题:1) 产生极化的放射性核;2) 放射性核极化度的保持;3) 射线角分布不对称性测量;4) RF 射频场技术使极化破坏或极化方向反转。通过对产生放射性核的核反应入射粒子的能量和放射性核的反冲角度的选择产生极化度较高的放射性核束;外加强磁场使放射性核在从产生、注入到阻止样品过程中能够保持初始极化;极化核注入到阻止样品后,通过施加高频 RF 脉冲使极化完全破坏或改变极化方向;采用由 2 个探测器构成的望远镜系统测量射线角分布不对称性来测定共振频率。

图 2 示出 β -NMR 和 β -NQR 靶室示意图。

用于极化破坏或改变极化方向的高频 RF 场由 RF 控制系统产生。产生的高频 RF 脉冲经放大后送入共振线圈回路,所产生的高频磁场 H_1 垂直于外加静磁场 H_0 。当 RF 场频率满足共振条件时,自旋极化被完全破坏,角分布呈现各向同性分布。用与自旋平行和反平行的由 3 个塑料闪烁体探测器构成的两个望远镜系统(分别称为上和下探测器)测量发射的 β 粒

子角分布。在望远镜的第 2 和第 3 个塑料闪烁体探测器间放置 3 mm 厚的 Al 衰减片,对探测系统进行了很好的磁屏蔽。图 3 为靶室和探测器系统的俯视图。图 4 示出射线探测系统方框图。

2 β -NMR 实验

为检验谱仪的可靠性,利用 β -NMR 装置测量了放射性核 ^{12}B 的半衰期、极化度和磁矩。

2.1 磁矩测量

放射性核 ^{12}B ($I = 1^+$, $T_{1/2} = 20.2$ ms) 用 $^{11}\text{B}(d,p)^{12}\text{B}$ 反应产生。靶为天然 B 靶,靶厚 $250 \mu\text{g}/\text{cm}^2$,均匀真空蒸镀在 0.5 mm 厚的 Ta 基体上。入射 D 束能量为 1.5 MeV,流强 $4.0 \mu\text{A}$ 。入射束以 5° 角打到靶上,产生的 ^{12}B 核以 $32^\circ \sim 48^\circ$ 通过 Cu 准直体反冲到 Cu 阻止样品中。阻止样品 Cu 纯度好于 99.9%,滚压为 $10 \mu\text{m}$ 厚,然后,经 800°C 退火 45 min 去除内部缺陷,并用三氯醋酸氨腐蚀抛光。

垂直于反应平面施加 0.217 T 静磁场以使反冲核 ^{12}B 在飞行过程中保持极化。垂直于外加静磁场施加一脉冲高频 RF 场,扫频宽度为 40 kHz。束流由静电偏转板控制,每 55 ms 提供 25 ms 束流时间,紧接束流脉冲后的是 3 ms 的 RF 脉冲,之后是 40 ms 计数时间(图 5)。

图 6 是实验测量的射线时间谱,由拟合得到产物 ^{12}B 的半衰期为 $T_{1/2} = 20.18 \pm 0.72$ ms,与文献[3]给出的 $T_{1/2} = 20.2$ ms 很好符合。

通过上、下探测器的计数比 U/D ,得到射线角分布的不对称分布。由 U/D 可测定共振频率。图 7 示出了 ^{12}B 在 Cu 中的 NMR 谱。

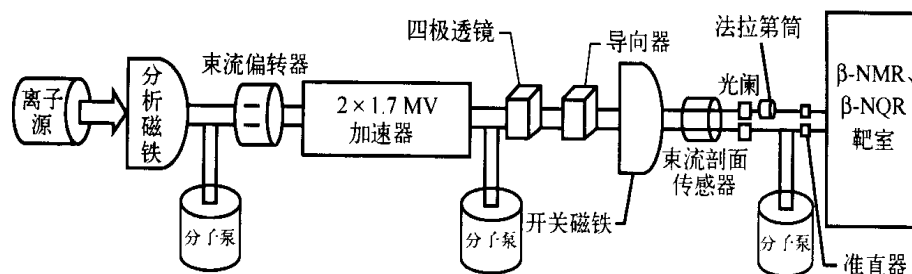


图 1 β -NMR 和 β -NQR 谱仪示意图

Fig. 1 β -NMR and β -NQR spectrometer

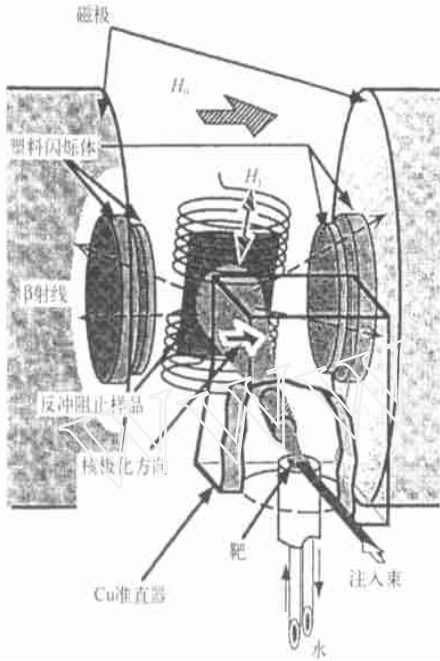


图2 -NMR、-NQR靶室示意图

Fig.2 -NMR, -NQR chamber

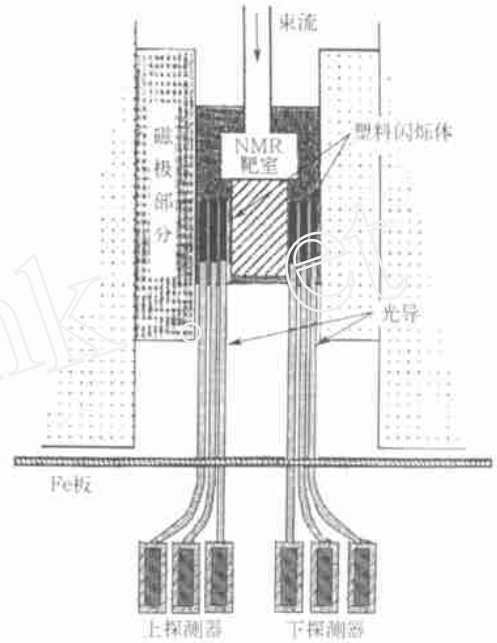


图3 靶室和探测器系统俯视图

Fig.3 Top view of chamber and detectors

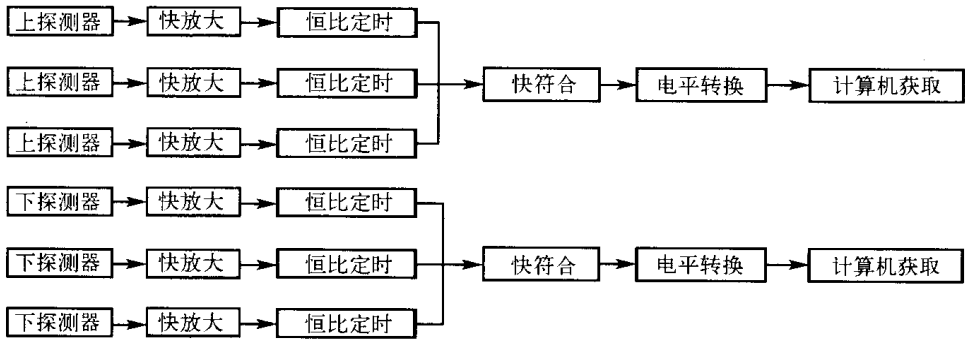


图4 射线探测系统方框图

Fig.4 Block diagram of detection system

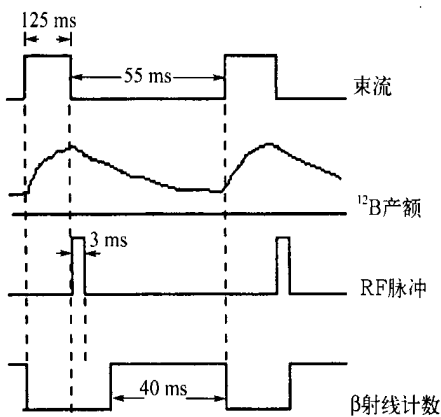


图5 时间序列

Fig.5 Time Sequence

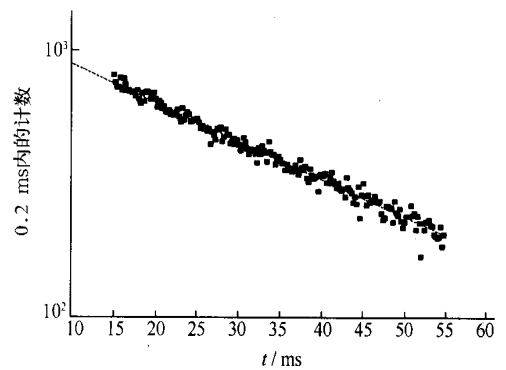


图6 实验测量的¹²B 射线时间谱

Fig.6 Time spectrum of ⁻emitter¹²B

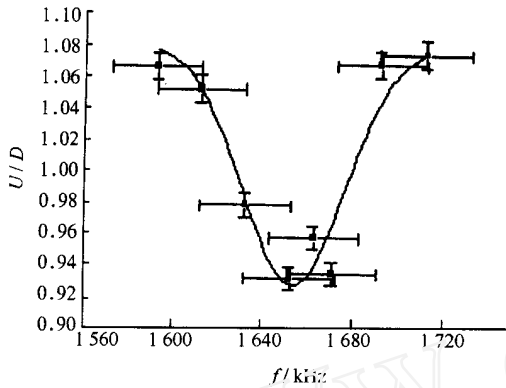


图 7 ¹²B 的 β -NMR 谱线

Fig. 7 β -NMR spectrum of ¹²B

室温, $H_0 = 0.217$ T

通过高斯拟合,得到共振频率为 1.6544 ± 0.0002 MHz,由共振频率计算得到磁矩 $\mu = (1.0002 \pm 0.0028)$ nm 和 g 因子 $g = 1.0002 \pm 0.0028$ 。本工作的实验测得值在误差范围内与文献[4,5]很好符合。

2.2 极化度测量

极化核 射线角分布为:

$$W(\theta) = 1 + AP \frac{v}{c} \cos \theta$$

$$AP = \frac{1 - X}{1 + X}, X = \frac{R_{on}}{R_{off}}$$

$$R_{on} = \left(\frac{U}{D} \right)_{on}, R_{off} = \left(\frac{U}{D} \right)_{off}$$

其中: A 为非对称参数; P 为核极化度; v 为 射线速度; c 为光速; θ 为 射线与极化轴间的夹角;下标“on”和“off”分别表示共振和非共振条件; $R = U/D$ 是上和下 2 个探测器的计数比。

从共振和非共振的 U/D 测量可得到极化度。图 8 示出了极化度随时间的变化。外推到 $t = 0$ 时刻,得到¹²B 在 Cu 中的极化度为 $11.4\% \pm 0.6\%$ 。

L. Pfeiffer 等^[6] 在反冲角 49° 、入射能量 1.5 MeV 时获得¹²B 在 Pt 中的极化度为 8% ; R. E. McDonald 等^[7] 在反冲角 40° 、入射能量 1.5 MeV 时获得¹²B 在 Cu 中的极化度为 10% ; T. Ohtsubo 等^[8] 在与本工作相同的实验条件下得到¹²B 在 Pt 中的极化度为 11% 。本工作的实验数据与这些数据基本符合。

实验测量中还观察到极化随时间的弛豫现象。

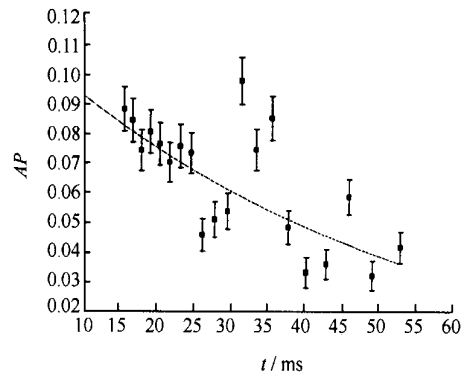


图 8 极化度随时间的变化

Fig. 8 Time dependence of polarization of ¹²B in Cu

3 结论

以上实验结果表明,所建立的 β -NMR 和 β -NQR 谱仪的工作性能是可靠的。利用该谱仪可进行核物理、粒子物理和凝聚态物理以及材料科学方面的研究。

参考文献:

- [1] Minamisono T, Ohtsubo T, Fukuda S, et al. New Nuclear Quadrupole Resonance Technique in β -NMR[J]. Hyperfine Interaction, 1993, 80:1 315 ~ 1 319.
- [2] Matsuta K, Ozawa A, Nojiri Y, et al. Observation of Spin Polarization of Projectile Fragments From $106 \text{ AMeV}^{40} \text{ Ca} + \text{Au}$ Collisions [J]. Phys Lett, 1992, B281:214 ~ 218.
- [3] Firestone RB, Shirley VS. Table of Radioactive Isotopes[M]. New York:John Wiley & Sons Inc, 1996. E1, 14 078.
- [4] Williams RL Jr, Pfeiffer L, Wells JC, et al. Nuclear Polarization in the $^{11}\text{B}(d,p)^{12}\text{B}$ Reaction [J]. Phys Rev, 1970, C2: 1 219 ~ 1 224.
- [5] Kurath D, Arima A. Quadrupole Moment of ^{11}C , ^{11}B and ^{12}B [J]. Journal of the Physical Society of Japan, 1973, 34(Supplement):529.
- [6] Pfeiffer L, Madansky L. Nuclear Polarization in the $^{11}\text{B}(d,p)^{12}\text{B}$ Reaction [J]. Phys Rev, 1967, 163:999 ~ 1 003.
- [7] McDonald RE, MaNab TK. Resonance Depolarization of ^{12}B Implanted in Metallic and Semi Conductor Hosts [J]. Phys Rev, 1974, C10: 946 ~ 948.
- [8] Ohtsubo T, Matsuda K, Araki T, et al. NMR-line Width of ^{12}B in Pt Metal Detected by Beta-NMR[J]. Hyperfine Interaction, 1993, 78:439 ~ 443.